

PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM  
KÖZGAZDASÁGTUDOMÁNYI KAR  
GAZDÁLKODÁSTANI DOKTORI ISKOLA

Torjai László

Optimális szállításütemezés a lágyszárú biomassa  
ellátási láncban

DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Témavezető: Kruzslicz Ferenc

Pécs, 2015

## **Tartalomjegyzék**

1. A kutatás célja .....	1
2. Az értekezés felépítése .....	2
3. A kutatás eredményei .....	4
4. További kutatási lehetőségek .....	9
5. A szerző tudományos közleményei az értekezés témájában .....	10
6. A tézisfüzetben hivatkozott irodalmak jegyzéke .....	11

## 1. A kutatás célja

A lágyszárú biomassa a fosszilis energiaforrások egy lehetséges helyettesítőjévé vált. Versenyképes alkalmazásához azonban biztosítani kell, hogy a biofeldolgozók alapanyag-ellátása megbízható és költséghatékony módon történjen meg, ami megköveteli a lágyszárú biomassa ellátási lánc (LBEL) optimális tervezését és üzemeltetését (Gold and Seuring 2011). Ezen ellátási láncok közös jellemzője a termőföldek és a biofeldolgozó közötti nagy volumenű logisztikai tevékenység, amely az alapanyag karakterisztikái miatt válik komplexé: alacsony tömeg- és energiasűrűség, szezonális termelés – folyamatos kereslet, a kínálat földrajzi töredezettsége, stb. (Miao et al. 2012).

Az ipari méretű LBEL esetén (például nagyméretű szalmatüzelésű CHP erőmű ellátása) a biomassa bálákat a termőföldekről depókba juttatják (satellite storage locations), majd ezekből történik meg a biofeldolgozó kiszolgálása nagy kapacitású, dedikált járműpark segítségével (Sokhansanj and Hess 2009, Voytenko and Peck 2012). Ravula és mtsai (2008) azt találták, hogy a logisztikai költségek 75%-a a szállító kamionok beszerzéséhez és üzemeltetéséhez köthető.

Munkám fő célkitűzése, hogy olyan döntéstámogató folyamatot és kapcsolódó matematikai modelleket dolgozzak ki, melyek alkalmazhatók a LBEL szállításütemezésének optimalizálására. A modellek kidolgozása előtt három megalapozó feladatot végzek el:

- A Supply Chain Council által kidolgozott SCOR folyamatmodell (SCC 2010) segítségével részletesen bemutatom a termelőktől a biofeldolgozóig tartó ellátási lánc felépítését és folyamatelemeit, valamint specifikálom az elemzett döntési szituációk körét.
- Kialakítom azt a döntési hierarchiát, mely a biomassa ellátási láncok tervezéséhez és üzemeltetéséhez kapcsolódó döntési szituációkat foglalja magában. Ez a hierarchia szolgál logikai vázként a releváns irodalom feldolgozásához, rendszerezéséhez.
- Feltárom a lágyszárú biomassa ellátási láncokat jellemző versenyprioritás struktúrát (elvárt stratégiai képességek rendszere), melyek meghatározzák a szállításütemezési modellek alkalmazásának módját, az azokba építendő célkitűzések és feltételek pontos körét és jellemzőit.

A kidolgozott matematikai modellek nem csak a szűken vett szállításütemezésre koncentrálnak. Segítségükkel az alábbi operatív és stratégia döntések támogatása történik meg:

- A depókból a biofeldolgozó raktáraiba történő alapanyag-szállítás és a szállító járművek ütemezése
- A depók és a biofeldolgozó közötti alapanyag-mozgatást lebonyolító járműflotta mérete
- A fel- és lerakodást végző eszközpark mérete
- A biofeldolgozó raktárainak kapacitása, a biztonsági készlet szint nagysága

A lágyszárú biomassza ellátási láncot jellemző bizonytalanság modellezésére a szenáriógenerálás módszerét alkalmazom. A nagyszámú elemi bizonytalan esemény egyedi hatásának elemzése helyett – részben az empirikus adatok hiánya miatt is – úgynevezett Aggregált Bizonytalansági Forгатókönyveket vezetek be, melyekkel az ellátás bizonytalansági szintjét reprezentálom.

Kutatásomat a Pécssett megvalósított 35MW teljesítményű, lágyszárú biomasszát tüzelő CHP erőmű esete motiválta.

## **2. Az értekezés felépítése**

A doktori értekezés kilenc fejezetből áll.

Az első fejezet célja, hogy általános bevezetést nyújtson a biomassza ellátási láncok témakörébe, behatárolja a részletesen elemzett lágyszárú biomassza ellátási lánc konfigurációt, valamint ismertesse az értekezés célkitűzéseit.

A második fejezetben a Supply Chain Council által kidolgozott SCOR folyamatmodell segítségével mutatom be a termelőktől a biofeldolgozóig tartó ellátási lánc felépítését és folyamatelekeit. Emellett kijelöltem azon döntési szituációk körét, melyekkel részletesen foglalkozom értekezésemben.

A harmadik fejezetben egyrészt felvázolok egy olyan döntési hierarchiát, amely a biomassza ellátási láncok tervezéséhez és üzemeltetéséhez kapcsolódó döntési szituációkat foglalja magában. Másrészt, ezen döntési hierarchia mentén átfogó irodalomkutatást végzek a döntési, döntéstámogató modellekre koncentrálva.

A LBEL versenystratégiájából következő termelési stratégia határozza meg a szállításütemezési modellek alkalmazásának módját, az azokba építendő célkitűzések és feltételek pontos körét és jellemzőit. Ezen kapcsolatrendszer feltárása érdekében a negyedik fejezetben megvizsgálom, hogy a lágyszárú biomassza ellátási láncnak milyen termelési képességekkel kell rendelkeznie (versenyprioritások struktúrája), valamint bemutatom, hogy ezen követelmények miként jelennek meg a szállításütemezési döntésekben.

Az ötödik fejezetben részletesen bemutatom az esettanulmányként használt LBEL konfigurációt, valamint a szállításütemezési döntési modelltől elvárt végső outputot (beszállítási menetrend). A probléma nagy mérete miatt egy háromfázisú hierarchikus ütemezési folyamatot alakítok ki, és mindegyik döntési fázis kapcsán megadom a figyelembe veendő – a versenyprioritás struktúrából származtatott – speciális célkitűzéseket és feltételeket.

A hatodik fejezetben az 1. döntési fázist elemzem. Ennek outputja egy olyan szállítási terv, melyben a tervezési időszak minden egyes napjára megadom a beszállítandó fuvarok számát, miközben elemzem a raktárkapacitás, a biztonsági készletszint, valamint a raktárközi anyagmozgatás alakulását.

A hetedik fejezetben a 2. döntési fázist elemzem. Ennek során már adotttnak tekintem a napi fuvarszámokat, és ezek depók közötti allokációja történik meg. Az alkalmazott döntési modellek eredményeként megkapjuk a felrakodó berendezések szükséges számát és a kamionflotta becsült méretét is.

A nyolcadik fejezetben a 3. döntési fázist elemzem. A napi fuvarszámok és azok depók közötti allokációjának ismeretében végzem el a fuvarok napon belüli ütemezését. Emellett megkapjuk a kamionok, valamint a fel- és lerakodó berendezések részletes ütemezését, valamint a napi járműigények nagyságát is.

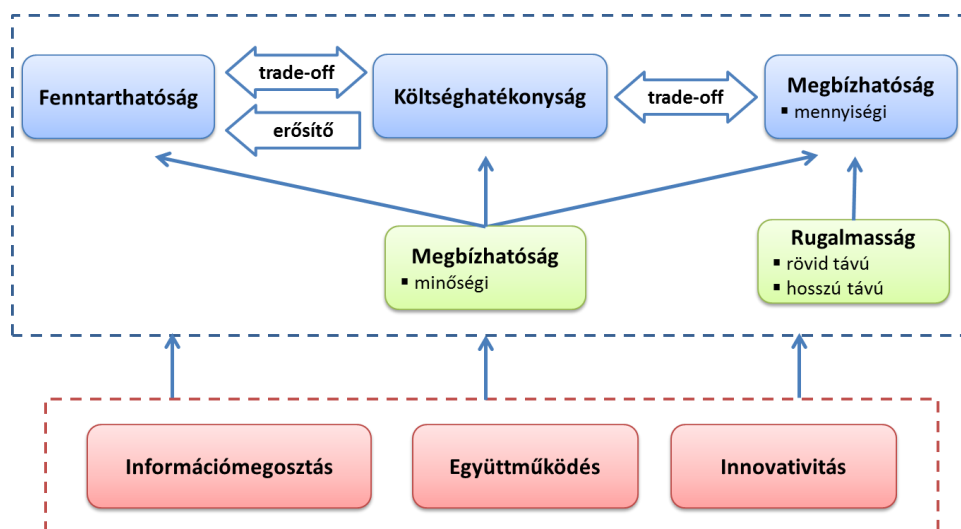
A kilencedik fejezetben bemutatom az értekezés tudományos eredményeit és számos további kutatási lehetőséget.

### 3. A kutatás eredményei

A dolgozat tudományos eredményeit foglalja össze röviden az alábbi felsorolás:

#### 1. tézis: A lágyszárú biomassa ellátási lánc (LBEL) modellje

Feltártam a LBEL versenyprioritásainak struktúráját (elvárt stratégiai képességek) az ellátási lánc teljesítményértékelési irodalom és a fisheri ellátási lánc illesztés elmélet mentén (3.1 ábra).



3.1 ábra Lágyszárú biomassa ellátási lánc versenyprioritásainak kapcsolatrendszere

A biomassa ellátási láncban a költséghatékonyság, a mennyiségi megbízhatóság és a fenntarthatóság tekinthetők az elsődleges versenyprioritásoknak. A beszállított alapanyag minősége befolyásolja mindhárom elsődleges versenyprioritás szintjét, míg a megbízható ellátásban alapvető szerepet játszik a rugalmasság versenyprioritás is. Támogató versenypriorításként az együttműködés, az információmegosztás és az innovativitás dimenziók is modellem részét képezik.

A LBEL szállításiütemezési döntési szituáció kezeléséhez egyrészt formálisan leírtam a beszállítási folyamatot, másrészt hierarchikus döntési modellt dolgoztam ki, melynek fázisai a következők:

1. Napok közötti ütemezés: a tervezési időszak minden egyes napjára meghatározzuk a beszállítandó fuvarok számát.
2. Depók közötti allokáció: az előző fázisban megadott fuvarszámokat allokáljuk a depók között.
3. Napon belüli ütemezés: ismert fuvarszám és depók közötti allokáció mellett végezzük el a fuvarok napon belüli ütemezését.

A szállításiütemezési döntések nem képesek hozzájárulni az összes versenyprioritás fejlesztéséhez, azonban érdemben befolyásolják a Költséghatékonyság, Rugalmasság és

Együttműködés (Méltányos ütemezés) elemeket. Ezek kapcsán megfogalmaztam a döntési modellekben figyelembe veendő célkitűzéseket és korlátozó feltételeket, valamint döntési fázisokhoz rendeltem azokat (3.2 ábra).

Verseny-prioritás	Célkitűzések	1. döntési fázis	2. döntési fázis	3. döntési fázis
<b>Költség-hatékonyság</b>	Felrakódó berendezések számának minimalizálása	–	<b>X</b>	–
	Járműflotta méretének minimalizálása	–	<b>X</b>	<b>X</b>
	Kamionok tétlen idejének minimalizálása	–	–	<b>X</b>
	Külső raktár kapacitásának minimalizálása	<b>X</b>	–	–
	Raktárközi anyagmozgatás minimalizálása	<b>X</b>	–	–
<b>Méltányos ütemezés</b>	Depónkénti átlagos szállítási hét maximumának minimalizálása	–	<b>X</b>	–
	Likviditási ciklus feltétel	–	<b>X</b>	–
<b>Rugalmasság (preaktív eszközök)</b>	Felrakódó berendezések számának alsó korlátja	Modellen kívüli feltétel		
	Többforrású beszállítás követelménye	–	<b>X</b>	–
	Járműflotta megemelt kapacitása adott ABF-nek megfelelően	–	<b>X</b>	–
	Napi szállítójármű-igény simítása	–	<b>X</b>	–
	Napi fuvarszámok simítása	<b>X</b>	–	–
	Speciális ütemezési szabályok	–	<b>X</b>	<b>X</b>
	Külső raktár megemelt kapacitása adott ABF-nek megfelelően	<b>X</b>	–	–
	Biztonsági készlet az erőmű raktáraiban adott ABF-nek megfelelően	<b>X</b>	–	–

3.2 ábra Célok, korlátozó feltételek és döntési fázisok kapcsolata

A fenti eredmények [1, 3, 4, 5] publikációkban jelentek meg.

## 2. tézis: 1. döntési fázis – „Napok közötti ütemezés” modellje és megoldása

Az 1. döntési fázis outputja egy olyan szállítási terv, melyben a tervezési időszak minden egyes napjára megadom a beszállítandó fuvarok számát, miközben elemzem a szükséges raktárkapacitás, a biztonsági készletszint, valamint a raktárközi anyagmozgatás alakulását. Az alapmodell kialakításához a hálózati folyam problémakör módszertanát, azon belül is a dinamikus sorozatnagyság (dynamic lot-sizing) modellt használtam fel. Az 1. tézis kapcsán bemutatott kiegészítő feltételek és célfüggvények modellbe építését, a döntési fázis elemzését a 3.3 folyamatábra szerint hajtottam végre.

Az egyes lépések végrehajtásához vegyes egészértékű programozási modelleket (MIP) írtam fel, miközben az alapanyag-ellátás bizonytalanságát Aggregált Bizonytalansági Forгатókönyvek generálásával reprezentáltam (szimulációs és optimalizáló modellek kombinációja).



3.3 ábra Az 1. döntési fázis elemzési folyamata

A fenti modelleket az AIMMS 3.13-as verziójában implementáltam, az optimalizáláshoz pedig Gurobi 5.1 szolvert használtam. A futtatás-sorozat – a nagyszámú bizonytalansági szcenárió ellenére is – tolerálható időtávon belül véget ért.

A tézis egyes részeredményeit [3, 5] publikációk tartalmazzák.

### 3. tézis: 2. döntési fázis – „Depók közötti allokáció” modellje és megoldása

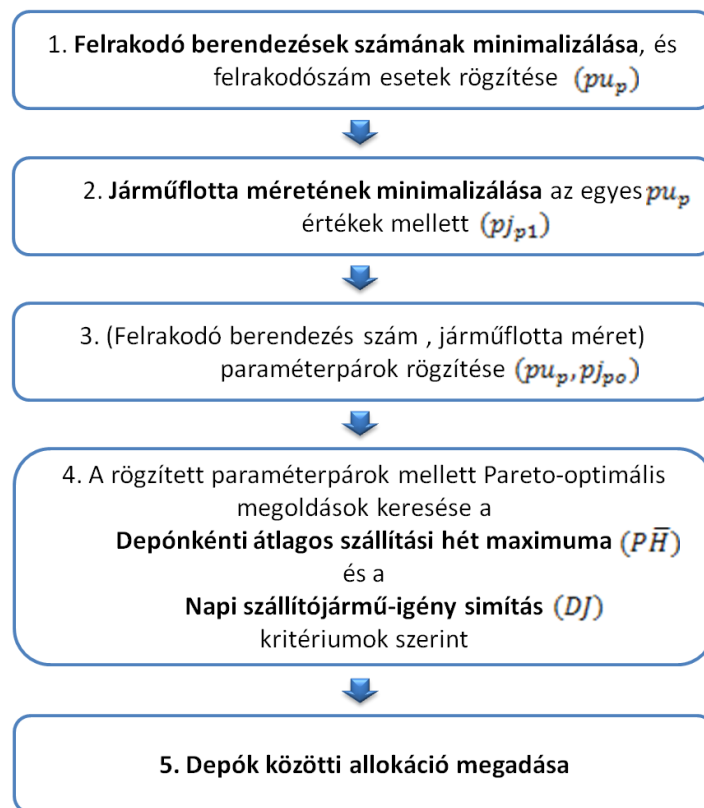
A 2. döntési fázisban a napi fuvarszámok depók közötti allokációja történik meg, ahol az alapmodellt egy speciális, többretegű hálózati folyam modell adja. A döntési fázis négy célfüggvénye szerinti Pareto-optimalis megoldások keresési folyamatát a 3.4 ábra mutatja be.

Az egyes lépések végrehajtásához vegyes egészértékű programozási modelleket (MIP) írtam fel egy adott Aggregált Bizonytalansági Forгатókönyv mellett.

A fenti modelleket az AIMMS 3.13-as verziójában implementáltam, az optimalizáláshoz pedig Gurobi 5.1 szolvert használtam. Az első két célfüggvény szerinti, bizonytalanság melletti optimalizálás jelentős futási időket eredményezett, ami megakadályozta a globális optimum elérésének, valamint felkeltette az igényt hatékony megoldó algoritmusok kidolgozására.

A tézis egyes részeredményeit [3, 5] publikációk tartalmazzák.





3.4 ábra A 2. döntési fázis elemzési folyamata

#### 4. tézis: 3. döntési fázis – „Napon belüli ütemezés” modellje és megoldása

A 3. döntési fázisban – adott fuvarszám és depók közötti allokáció mellett – végeztem el a fuvarok napon belüli ütemezését. Itt kapjuk meg a kamionok, valamint a fel- és lerakodó berendezések részletes ütemezését, a szükséges járműflotta pontos nagyságát.

A döntési fázis során definiáltam az irodalomban korábban még nem tárgyalt Biomass Truck Scheduling (BTS) problémát. A BTS felfogható egy Párhuzamos gépes egyszerveres ütemezési problémaként, ahol azonos kamionok (párhuzamos gépek) szállítják a biomasszát a depókból a központi biofeldolgozóba, ahol egyetlen lerakodó daru (egyetlen szerver) üzemel. Két speciális feltételt fogalmaztam meg az alapmodell kapcsán: a szerver művelet egységnyi hosszúságú minden fuvar esetén és a szerveret tétlen idő nélkül kell üzemeltetni. Az 1. tézisnek megfelelően két célfüggvény szerint optimalizáltam a feladatot: elsőként a minimális kamionszámot kerestem, majd ennek rögzítése után minimalizáltam ezek tétlen idejét. Alternatív MIP modelleket dolgoztam ki a BTS megoldására, és nagyszámú tesztet generálásával elemeztem ezek számítási időszükségeit.

Az 1000 esetből álló tesztalmaz megoldása a probléma több érdekes jellemzőjére hívta fel a figyelmet. Egyrészt, a fuvarok átlagos hossza, valamint az első feladat (kamionszám minimalizálás) bináris változóinak lazításával nyert megoldás jó becslését adja a minimális

kamionszámnak, másrészt a minimális kamionszám rögzítése mellett is található tétlen idő nélküli ütemezés. A javasolt MIP modellek elegendően hatékonyak bizonyultak ahhoz is, hogy az eredeti ütemezést felborító nem várt események bekövetkezése esetén valós időben megtörténhessen a fuvarok újraütemezése.

A 3. döntési fázis elemzéséhez felhasználtam a BTS alapmodellt, valamint annak néhány kiterjesztett változatát is.

A tézis eredményeit [2, 6] publikációk tartalmazzák.

A dolgozat azon további elemei, melyek újdonságtartalommal bírnak:

- A lágyszárú biomassa ellátási lánc (LBEL) ellátási folyamatának – az alapanyag termelésétől az energetikai hasznosításig – részletes leírása a Supply Chain Operations Reference (SCOR) modell segítségével.
- A LBEL 16 elemből álló döntési hierarchiája – a termékszerkezet meghatározásától a karbantartás ütemezéséig –, és a biomassa ellátási láncok releváns irodalmának feldolgozása ezen hierarchia mentén.

Megjegyzem, hogy a dolgozat magját jelentő szállításiütemezési modellek felhasználhatók más, hasonló jellemzőkkel bíró energetikai rendszerek kapcsán is, mint például biogázt vagy bioüzemanyagot előállító üzemek alapanyag-ellátásának tervezése és ütemezése. A kidolgozott matematikai modellek egy csoportja esetén lehetőség adódik alkalmazási területük további kiterjesztésére, így azok felhasználhatók nagy volumenű, lokális beszállítást (vagy disztribúciót) igénylő logisztikai rendszerek vagy éppen termelési feladatok ütemezése során is.

## 4. További kutatási lehetőségek

Az értekezés megírása során számos további kutatási irányvonalat, lehetőséget azonosítottam, melyek az alábbiak:

- A biomassza ellátási lánc döntési hierarchia (3.2 ábra) kiegészítése a releváns kapcsolódó döntési szituációkkal, valamint az egyes döntési szituációkhoz jellemző indikátorok, teljesítménymutatók (KPI) rendelése.
- A lágyszárú biomassza ellátási lánc versenyprioritás struktúrájának (4.4 ábra, 4.6 táblázat) empirikus verifikálása.
- A lágyszárú biomassza ellátási lánc támogató versenyprioritásainak részletesebb elemzése (4.4 ábra, 4.6 táblázat), kapcsolatrendszerük cizelláltabb feltérképezése.
- A szállításütemezést jellemző bizonytalanság részletesebb modellezése a szcenáriógenerálástól eltérő módszerekkel.
- Környezeti információk (például időjárás, forgalmi információk) felhasználása az szállításütemezési döntési modellekben, online ütemezés.
- Újratervezési megoldások kidolgozása a szállításütemezési probléma kapcsán.
- A 2. döntési fázis során alkalmazott „kerekítési” eljárások hatékonyságának vizsgálata és további megoldások kidolgozása.
- A 2. döntési fázisban, a kieső fuvarok különböző pótlási politikáinak elemzése, azokhoz hatékony megoldó algoritmusok kidolgozása.
- A 2. döntési fázisban, a felrakodó berendezések számát minimalizáló, nagy számításigényű problémához hatékony megoldó algoritmus kidolgozása (például oszlopgenerálás módszere).
- A 3. döntési fázisban megfogalmazott két nyitott kérdés (minimális járműszám becslése és a célfüggvények közötti trade-off) további vizsgálata.
- A 3. döntési fázis kapcsán különböző (robosztus) ütemezési politikák alkalmazása és hatásuk elemzése.
- A 3. döntési fázis alapmodelljének (BTS) életszerű kiterjesztései.
- Judd és mtsai (2012) BLP-M modelljéhez hasonlóan, a szállításütemezési modell kiegészítése a mobil felrakodó berendezések optimális útvonaltervezésével.
- Empirikus költségértékek figyelembe vétele a szállításütemezési modellekben.

## 5. A szerző tudományos közleményei az értekezés témájában

### ▪ Lektorált folyóiratcikk, idegen nyelven

- [1] Torjai L, Nagy J, Bai A, Decision hierarchy, competitive priorities and indicators in the large-scale 'herbaceous biomass to energy' supply chain, Biomass and Bioenergy 80 (2015) 321-329 (IF **3,394**)
- [2] Torjai L, Kruzslicz F, Mixed integer programming formulations for the Biomass Truck Scheduling problem, Central European Journal of Operations Research (2015) doi: 10.1007/s10100-015-0395-6 (IF **0,832**)
- [3] Szendrői E, Torjai L, Decision support application for design and management of energygrass supply chain, Pollack Periodica 3 (2008) 41-52

### ▪ Lektorált folyóiratcikk, magyar nyelven

- [4] Hau O, Pitz M, Torjai L, A lágyszárú biomassza ellátásilánc-menedzsment kérdései – az alapanyag-termelőktől az erőműig, Vezetéstudomány 41 (2010) 62-70
- [5] Torjai L, Szendrői E, Döntéstámogató alkalmazás az energiafű ellátási lánc tervezéséhez és irányításához, GIKOF Journal 6 (2008) 33-44

### ▪ Konferencia kiadványban megjelent publikáció

- [6] Torjai L, Pitz M, Energygrass Supply Scheduling to Minimize Investment and Operating Costs, In: Serifoglu F, Bilge Ü (eds.), PMS 2008 Proceedings of the Eleventh International Workshop on Project Management and Scheduling, Istanbul (2008) 265-268

### ▪ Konferencia előadás

- [7] Nagy J, Torjai L, Hierarchical transportation scheduling in herbaceous biomass supply chains, ISIR 2014 – 18th International Symposium on Inventories, Budapest, 2014
- [8] Torjai L, An effective algorithm to solve Energygrass Supply Scheduling problem, EURO XXIV – 24th European Conference on Operational Research, Lisbon, 2010
- [9] Torjai L, Pitz M, Energygrass Supply Scheduling to Minimize Investment and Operating Costs, PMS 2008 – 11th International Workshop on Project Management and Scheduling, Istanbul, 2008

## **6. A t  zisz  zetben hivatkozott irodalmak jegyz  ke**

- Gold S, Seuring S, Supply chain and logistics issues of bio-energy production, Journal of Cleaner Production 19 (2011) 32-42.
- Judd JD, Sarin SC, Cundiff JS, Design, modeling, and analysis of a feedstock logistics system, Bioresource Technology 103 (2012) 209–218.
- Miao Z, Shastri Y, Grift TE, Hansen AC, Ting KC, Lignocellulosic biomass feedstock transportation alternatives, logistics, equipment configurations, and modeling, Biofuels, Bioproducts and Biorefining 6 (2012) 351–362.
- Ravula PP, Grisso RD, Cundiff JS, Comparison between two policy strategies for scheduling trucks in a biomass logistic system, Bioresource Technology 99 (2008a) 5710–5721.
- SCC, The Supply Chain Council, Inc., SCOR: Supply Chain Operations Reference – Version 10.0, August 2010, URL: [www.supply-chain.org](http://www.supply-chain.org), Let  lt  s d  tuma: 2011.10.26.
- Sokhansanj S, Hess JR, Biomass Supply Logistics and Infrastructure, Biofuels Methods and Protocols, Jonathan Mielenz (ed) Humana Press, New York, 2009, 1-25.
- Voytenko Y, Peck P, Organisational frameworks for straw-based energy systems in Sweden and Denmark, Biomass and Bioenergy 38 (2012) 34-48.